

플라스틱 분체원료 건조효율 증대를 위한  
열풍 건조호퍼 형상 개선에 관한 연구

정우현, 이계봉, 정석우  
고동기술연구원 플랜트엔지니어링센터

A Study on the Geometry Improvement of Hopper Dryer  
for Drying Efficiency Increase of Plastic Material

Jung Woo Hyun, Lee Kyae Bong, Chung Seok Woo  
Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering (IAE)

1. 서론

일반적으로 플라스틱제품 제작업체의 성형방법 중 가장 대표적인 것이 사출성형과 압출성형이다. 사출성형은 성형재료를 가열용융시켜 미리 닫힌 금형의 캐비티에 사출 충전한 후 고화 또는 경화 시켜 성형품으로 하는 성형법이고, 압출성형은 각종의 박층 기재의 표면에 열가소성 플라스틱 재료를 압출기를 사용하여 가열용융한 유동상태로 한 뒤 얇은 필름상으로 압출하는 동시에 연속으로 압착하는 가공법이다. 본 연구팀에서는 중소기업 직무기피요인 해소사업의 일환으로 압출/사출 공정에서 사용되는 분말 및 액상의 각종 원료를 계량, 정량공급 및 혼합하는 장비 개발과제를 수행하고 있는데 이러한 공정 중 분체 및 액상 원료의 저장, 계량, 이송, 혼합 공정을 자동화함으로써 공정에서 발생하고 있는 작업자의 직무기피요인을 제거하고, 계량/혼합 정확도를 향상시켜 생산성 향상 및 제품 원가절감을 달성하고자 하는데 목적이 있다. 이러한 공정 중에서 원료를 압출기나 사출기로 공급하기 전에 가열된 공기를 이용하여 원료를 건조하는데, 일반적으로 가열공기가 Pellet형태로 충전되어 있는 원료 사이를 통과하여 상승하는 통기건조방식의 열풍건조호퍼를 사용한다. 이런 통기건조방식은 가열공기가 원료 사이를 얼마나 균일하고 빠르게 통과하여 상승하는가가 건조능력을 좌우하게 된다. 만일 건조효율이 떨어져 원료가 충분히 건조되지 않은 상태에서 압출/사출기로 유입될 경우 불량품의 발생확률이 증가되며, 제품에 따라 성형시 이용되는 분말이나 액상의 첨가제를 혼합할 경우에도 첨가제에 따라 수분에 민감한 종류가 있을 수 있어 혼합 원료의 건조공정은 생산제품의 품질을 결정하는 중요한 요인이 된다. 또한 건조효율이 떨어질수록 건조시간이 길어지게 되므로 건조를 위해 사용되는 공기를 가열하는데 사용되는 에너지 소모량이 증대되게 된다.

과제 참여업체에서 사용하던 열풍건조호퍼 형태는 하부에서부터 가열된 공기를 선회를 시키며 내부로 유입하여 상부로 유출되는 방식이었다. 하지만, 이러한 형태의 열풍건조호퍼를 사용한 결과, 내부에서 유동 및 온도분포가 편중되어 전체적으로 건조효율이 떨어지는 현상이 나타났었다. 본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 열풍건조호퍼의 형상개선을 진행 하였는데, 가열공기의 유동 및 온도분포를 기존에 사용하였던 형태에서보다 균일하게 하여 건조효율을 향상시켜 건조시간을 줄여 건조를 위해 사용되는 공기를 가열하는데 사용되는 에너지 소모량을 감소시키고 또한 생산제품의 불량품을 줄이도록 하여 품질을 높일 수 있도록 하였다.

2. 설비 개선

2-1. 플라스틱 압출성형공정 개선

플라스틱 압출성형공정을 살펴보면 분체원료 건조 및 정량공급장치, 액상원료 정량공급장치, 분말원료 정량공급장치, 압출성형기 및 부대장치로 구성된다. 아래의 그림 1에 전체

플라스틱 압출성형공정을 간략하게 나타내었다.

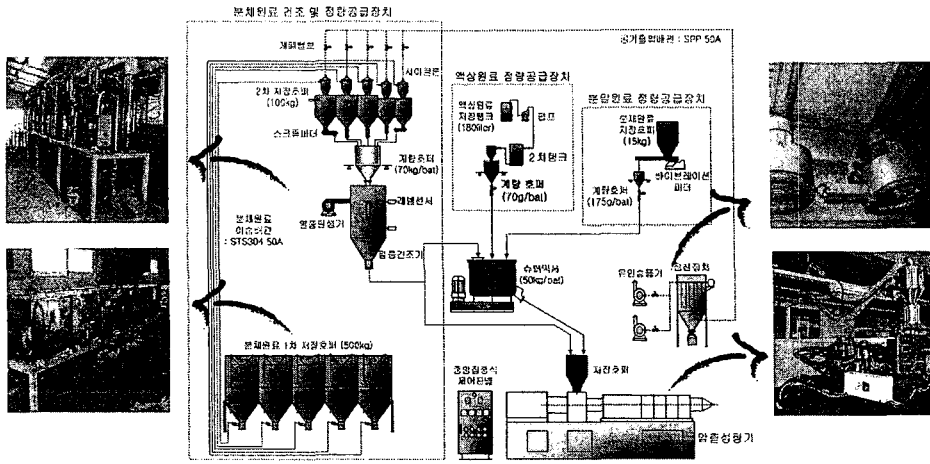



그림 1. 플라스틱 압출성형 공정도

플라스틱 분체 및 액상의 각종 원료를 색소첨가제, 분쇄제 등과 함께 혼합기에 수작업으로 계량하면서 공급하여 혼합한 후, 이러한 혼합원료를 압출기로 공급하여 제품을 생산하는 공정으로 구성되어 있는데 이러한 공정 중 분체 및 액상 원료의 저장, 계량, 이송, 혼합 공정을 자동화하였다.

### 2-2. 열풍건조호퍼 형상 개선

형상개선을 위하여 전산해석방법을 이용하였는데 상업용 CFD code인 미국 Fluent사의 Fluent 6.0을 사용하여 새로운 열풍건조호퍼의 설계 전에 형상변경 전, 후의 열풍건조호퍼내부의 가열공기 유동 및 온도분포를 해석하였다. 전산해석에 사용된 가열공기의 공급조건, 플라스틱제품에 사용되는 건조할 원료의 물성치를 표 1에 나타내었다. 원료의 경우 참여업체에서 사용하는 주 원료인 폴리아세탈(POM, Polyacetal)의 물성치를 이용하였다.

표 1. 가열공기의 공급 조건 및 건조시료의 물성치

구분	물성치	
가열공기 조건	공급유량	0.15025 kg/s
	가열온도	100 °C
건조원료(폴리아세탈) 	밀도	1410 kg/m <sup>3</sup>
	비열	1465.341 J/kg-K
	열전도도	0.2302 W/m-K

형상을 개선한 열풍건조호퍼는 내부에 채워지는 원료를 균등하게 분배하기 위한 역콘형태의 분배기에 상부에서부터 내통을 연결하여 가열된 공기를 열풍건조호퍼 내부에서 유입될 수 있게 구성하였다. 아래에 전산해석에서 사용한 Grid형상을 그림 3에 나타내었고 방법을

표 2에 정리하였다.

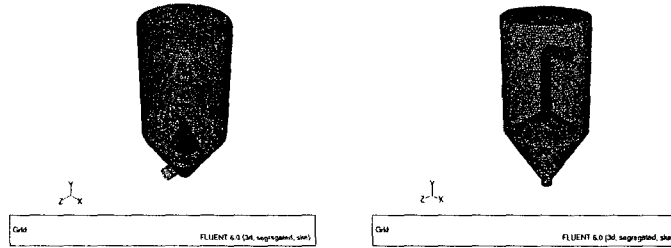


그림 3. 전산해석에 사용된 Grid 형상

표-2. 전산해석 방법

구분	내용	
	열풍건조호퍼 1(형상개선 전)	열풍건조호퍼 2(형상개선 후)
격자구조	Unstructured grid	Unstructured grid
격자형상	사면체	사면체
격자(Cell)개수	285,506	334,518
난류모델	표준 k-ε모델	표준 k-ε모델
복사모델	P-1 근사법	P-1 근사법
압력보정모델	SIMPLE 알고리즘	SIMPLE 알고리즘

형상 개선 전, 후의 경우 모두 해석할 영역을 구분하여 격자를 생성하였는데, 각각 가열된 공기가 건조할 원료와 만나는 영역, 건조할 원료가 충전 되어있는 영역, 가열된 공기가 건조할 원료를 통과한 후 출구까지 영역이다. 이중 건조할 원료가 충전 되어있는 영역은 상부에서 200mm 떨어진 곳까지 설정하였으며, 이 영역에서는 가열된 공기의 유동이 충전 되어있는 시료내부에서의 유동이므로 영역을 Porous Media로 처리하여 시뮬레이션을 수행하였다. 여기서 적용한 Porous Media내부에서의 압력손실을 살펴보면 다음과 같다.

$$\Delta p = \frac{(1-\epsilon)\rho L S_p}{\epsilon^3 v_p} \left[ \frac{K_1 \mu \overline{V}_0 (1-\epsilon) S_p}{V_p \rho} + K_2 \overline{V}_0^2 \right]$$

Ergun은 실험적으로  $K_1 = 150/6$ ,  $K_2 = 1.75/6$  임을 밝혀내었으며  $S_p = \frac{6}{\phi_s}$ 이므로 대입하여 정리하면 Fluent에서 사용하는 식과 같아지게 되며 그 식은 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{|\Delta p|}{L} = \frac{150 \mu (1-\epsilon)^2}{D_p^2 \epsilon^3} v_\infty + \frac{1.75 \rho (1-\epsilon)}{D_p \epsilon^3} v_\infty^2$$

여기서  $\mu$ 는 내부에서 흐르는 유체의 viscosity,  $D_p$ 는 입자의 평균지름,  $L$ 은 porous media층의 깊이,  $\epsilon$ 는 porous media층의 void fraction이고 구형도(Sphericity,  $\phi$ )는 생략하였다. 보통 Reynolds값이 1~1000이면 위의 Ergun Equation을 그대로 사용하고 1미만인 경우는 오른쪽 둘째 항을 생략한 Kozeny-Karman Equation을 1000보다 크면 오른쪽 첫째 항을 생략한 Burke-Plummer Equation을 사용한다 [3-5].

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 공정개선 결과

플라스틱 압출성형공정의 자동화와 설비개선을 진행한 결과를 다음의 그림 4에 나타내었다.

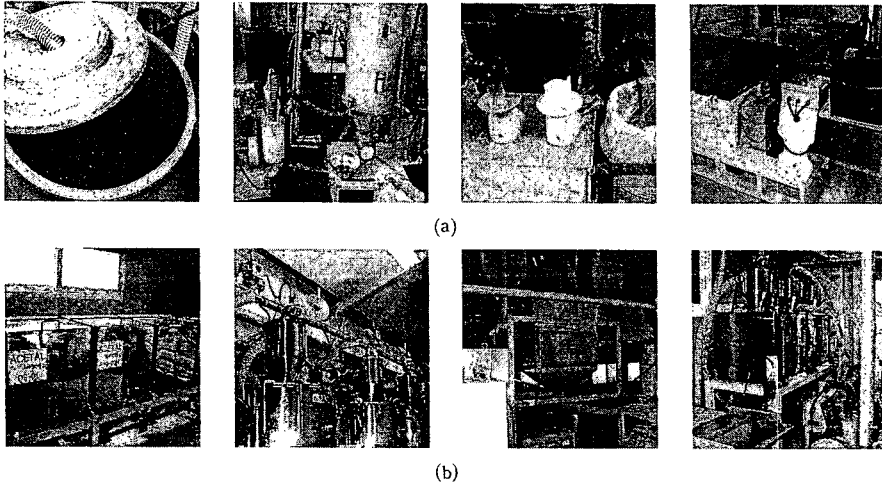


그림 4. 공정개선 전, 후 설비 비교

위에서 (a)는 설비개선 전, (b)는 설비개선 후의 설비를 보여주고 있으며 순서대로 분체원료 저장호퍼 시스템, 원료 열풍건조 및 저소음 공압이송장치 분체 및 액상원료 계량, 정량공급장치 분체제 원료 저장 및 자동공급장치를 보여주고 있다. 설비개선 후에는 중앙집중식 제어판넬을 이용한 모든 설비들의 연계 운전이 원활히 진행되었으며, 일부 배관에서 분체원료의 이송중 적체되는 문제가 발생하였으나 배관 수정 및 제어로직 개선을 통하여 해결하였다. 또한 원료공급의 핵심이 되는 분체 및 액상원료 정량공급장치에 대하여 정량공급 성능을 측정된 결과 공급오차는 공급량 설정값에서  $\pm 2\%$  이내인 것으로 측정되었다.

#### 3-2. 전산해석 결과

형상개선 전, 후의 열풍건조호퍼의 전산해석 결과를 살펴보면 그림 5는 내부 유동흐름을 나타낸 것으로 (a)는 형상개선전의 열풍건조호퍼의 내부 유동흐름을, (b)는 형상개선후의 열풍건조호퍼의 내부 유동흐름을 나타내고 있다. (a)의 경우 가열공기가 하부의 입구에서 내부로 들어오면서 선회를 하며 건조할 원료로 유입이 되는 것을 확인 할 수 있다. 하지만 가열공기가 유입되는 입구의 위쪽영역과 건조할 원료가 충전된 내부에서는 선회하는 흐름에 따라 흐름이 거의 없는 Dead zone이 생김을 알 수 있다. 이러한 흐름이 건조효율을 저하시킨 원인으로 판단된다. 반면에 (b)를 보면 하부에서부터 나온 가열된 공기가 균일하게 건조할 원료층 내부를 통과하여 출구로 나가는 것을 알 수 있다. (c)는 형상 개선 후 호퍼건조기 하부에서 재순환되는 흐름을 보여주고 있다. 형상개선 후 열풍건조호퍼 하단의 건조할 시료층 내부에서 가열공기가 재순환 되는 것을 볼 수 있다. 따라서 이렇게 가열된 공기가 재순환되는 영역이 생김에 따라 건조 효율이 높아질 것으로 예상된다.

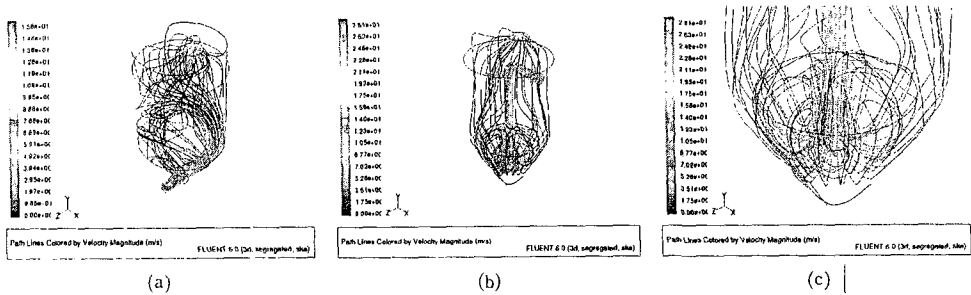


그림 5. 열풍건조호퍼의 내부유동

그림 6는 형상 개선 전, 후의 열풍건조호퍼의 내부의 온도분포 contour plot을 70~100℃로 온도범위를 같게 하여 나타낸 것으로, 유동의 흐름에 따라 온도의 분포도 같은 경향을 보임을 알 수 있다. (a)는 형상 개선 전의 열풍건조호퍼로서 입구에서 연결된 부근과 흐름이 적은 위쪽 부근의 온도차이가 심하고 호퍼건조기 내부에서도 온도분포가 일정하지 않은 것을 확인 할 수 있다. 이는 유동의 흐름에 따라 국부적으로 가열이 발생되어 전체적인 건조 효율이 떨어지게 되는 원인이라 할 수 있다.

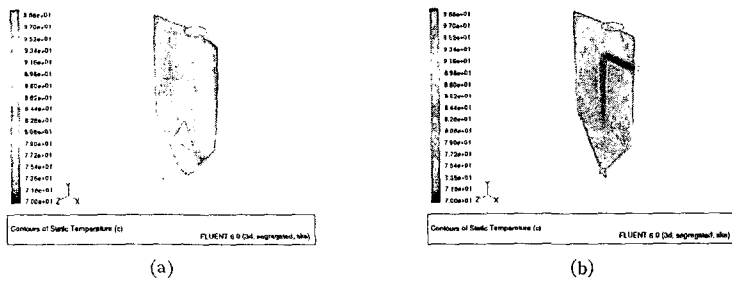


그림 6. 열풍건조호퍼의 내부온도분포 Contour Plot

또한 형상 개선 전의 열풍건조호퍼 내부에서 가장 낮은 온도가 27.9℃ 이었지만 형상 개선 후에는 가장 낮은 곳의 온도가 61.2℃ 정도로 해석되었으며 이러한 차이는 그림에서 보듯이 형상개선 후 열풍건조호퍼의 내부에서의 유동흐름이 균일한 점에 기인한 결과로 보여진다. 또한 출구단면에서의 평균온도도 83.1℃와 89.7℃로 차이를 나타내었다.

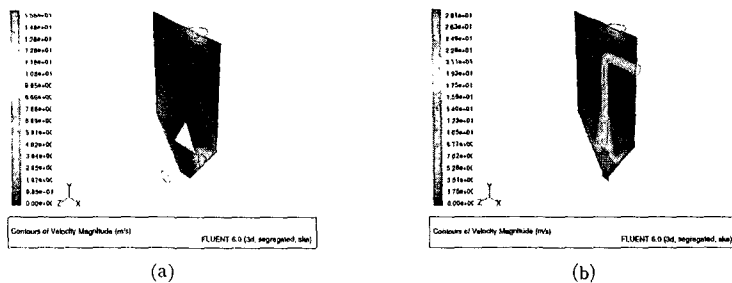


그림 7. 열풍건조호퍼의 내부속도분포 Contour Plot

그림 7은 형상 개선 전, 후 열풍건조호퍼의 내부에서 속도분포를 contour plot으로 나타

낸 것이다. 형상 개선 전에는 입구에서 가열공기 속도가 16.41m/s로 가장 빨랐으며 형상 개선 후에는 가장 빠른 곳이 가열공기를 내부로 보내는 duct의 elbow 부근에서 29.24m/s로 유속의 차이가 나타났는데, 이는 가열공기 공급배관의 크기를 줄인 결과로 생긴 것이다. 하지만 속도분포의 경우는 입구에서 나온 가열된 공기의 유속분포가 형상 개선 후 균일한 점을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

개발된 정량공급장치를 적용하였을 경우에 압출/사출기에서 생산되는 제품의 특성을 기존에 작업자가 수작업으로 정확히 계량하여 공급하였을 경우 생산된 제품과 비교하였는데, 불량률을 측정된 결과 기존 제품과 품질 측면에서 전혀 차이가 없으며 장시간 작업자의 수작업 근무시 발생하는 불량품 발생을 고려할 경우 불량률이 감소할 것으로 판단된다.

개선된 열풍건조호퍼 형상에서 내부의 유동 및 온도분포가 기존에 사용하였던 형태보다 균일하게 나타났으며, 가열된 공기가 호퍼건조기 하부에서 재순환되어 상승하면서 외부로 유출됨에 따라 전체적으로 건조효율이 높아지는 결과를 나타내었다. 따라서 가열공기를 내부에서 공급하는 것이 하부에서 선회를 주어 공급하는 것보다 건조효율을 높이는 형태임을 알 수 있었다. 또한 전산해석 결과를 기초자료로 활용하여 실제 호퍼건조기를 설계/제작하고 설치하여 운전한 결과 건조효율 증대에 따라 건조시간이 단축되었으며 불량품 발생이 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.

#### 5. 감 사

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 "중소기업 직무기피요인 해소사업"의 일환으로 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

#### 6. 참고문헌

1. 박명치, 권영수; "기류건조기의 설계 (I)", HWAHAK KONGHAK, 12(6), 353-360 (1974).
2. 권영수, 박명치; "기류건조기의 설계 (II)", HWAHAK KONGHAK, 13(1), 33-43 (1975).
3. Rajesh Rajamani, C Srinivas, P Nithiarasu, K N Seetharamu; "Convective heat transfer in axisymmetric porous bodies", International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 5(9), 829-837 (1995)
4. K Murugesan, H.R. Thomas, P.J. Cleall; "An investigation of the influence of two-stage drying conditions on convective drying of porous materials", International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 12(1), 29-46 (2002)
5. Kaviany. M.; "Principles of heat transfer in porous media", Springer Verlag, 2nd ed.,1995